

学校编码: 10384  
学号: X2010181028

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

# 扩束后的激光波面特性及其实验设计分析

The experimental design and analysis for wavefront  
characterizing of an expended laser beam

林坤生

指导教师姓名: 陈理想教授  
陈主荣高级工程师

专 业 名 称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2015 年 4 月

论文答辩时间: 2015 年 月

学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_  
评 阅 人: \_\_\_\_\_

2015 年 4 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(厦门大学物理系量子光学)课题(组)的研究成果,获得(陈理想 教授)课题(组)实验室的资助,在(厦门大学物理系)实验室完成。

声明人(签名):

年 月 日

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

- (        ) 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年    月    日解密，解密后适用上述授权。
- (        ) 2. 不保密，适用上述授权。

声明人（签名）：

年    月    日

## 摘要

激光波面分析与检测是精密测量技术的一个研究方向，它是建立在干涉测量技术的基础上而发展起来的。在经典物理学中，杨氏双缝干涉是最经典的干涉现象，这种干涉是基于等倾干涉原理通过条纹的变化来检测相干光束的波面特性。另外，基于等厚干涉技术发展起来的准直光检验器，在高效方便化的准直技术检验方面展现出了巨大的发展潜力。本文以由一块平行平晶组成的准直光检验器为核心，利用扩束镜改变 633nm He-Ne 激光器的波面特性，在扩束镜光路轴后方，利用准直光检验器检验扩束激光波面特性，并结合光电技术 CCD 来呈现光波干涉条纹变化的现象，主要研究内容包括以下几个方面：

(1) 调节准直光检验器与入射光束的角度，让 633nm He-Ne 激光器发出的光源，当调整扩束镜倍率为 10 倍固定及准直光检验器至扩束镜的距离为 40cm 时，调整准直光检验器与激光器的不同角度，发现角度越大，干涉条纹越密集，越不好观察，角度越小，干涉条纹越分散，越容易观察，这说明，平行平晶角度的变化使前后面两束光的干涉角度产生变化，从而使干涉面的条纹频率也产生了变化。因此，这个实验论证了，平行平晶面与入射光的夹角也就是最佳观察角度为  $5^\circ$ ，才能观察到最好的干涉条纹。假若角度变大，干涉条纹将开始分开，若太小，则光学干涉条纹越细小，越不易观察。

(2) 调节准直光检验器与扩束镜的距离，通过观察干涉条纹变化来检测不同位置光束波面特性的变化。633nm He-Ne 激光器发出光源，调整扩束镜倍率 10 倍固定，按照 (1) 中得出准直光检验器与激光器角度成最佳观察角  $5^\circ$  时，调整准直光检验器至扩束镜的距离为分别为 15cm、35cm 和 55cm 时，对比三个实验结果图，发现随着距离的增加，曲率半径越大，干涉条纹变的越来越稀疏，说明，扩束镜后的光束是球面波，球面波在不同的位置曲率半径不同，曲率半径不同产生的前后面两束光的干涉角度不同，即干涉条纹的频率不同，实验证明了曲率的半径越大，干涉条纹频率越低（条纹越粗），球面波就越接近于准直光。

(3) 在 (1) (2) 设计的利用准直光检验器最佳条件基础上，我们固定其位置和偏转角，调节扩束镜倍率，改变出射光束的平行性，来观察经过准直光检验

器的干涉条纹的变化。我们发现当扩束镜倍数为 5 倍时，干涉条纹比较稀疏；当扩束镜倍数为 10 倍时，干涉条纹密集，这说明扩束镜的倍率越大，曲率半径越小，干涉条纹越密集，光速越远离准直光。

**关键词：**准直光检验器；光的干涉；波面特性；曲率

厦门大学博硕士论文摘要库

## Abstract

The analysis and detection of the laser beam wavefront is becoming an important branch of the precision measurement technology. It is based on the the principle of the coherent light interference. In classical physics, the most classic phenomenon is the young's double-slit interference. This technique is based on the equal inclination interference principle to test the wavefront characterizing of the light beam. However, based on the equal thickness interference technology, scientist design a popular collimation light detector which have showed huge development potential in efficient and convenient light collimation test technology. In this paper, we use a collimation light detector which is composed of a pair of optical parallel as the core idea to test the depth of parallelism of light. We use a beam expander to change the light parallelism of a 633 nm He-Ne laser. By utilizing the expended laser beam wavefront characterizing and a CCD camera where behind the beam expander, we study the phenomenon of the change of the light interference fringes. The main research content includes the following aspects:

(1) By observing the changes of the interference fringes, we can design the best angle of the collimation light detector. The light source is come from a 633 nm He-Ne laser .When adjust the beam magnification ratio in 10 and the distance between the collimation light detector and the beam expander is fixed at 40 cm, by adjusting the relative angle between the collimation light detector and the laser, we find that the greater of the angle, the interference fringes are more and harder to be observed. On the contrary, the smaller of the angle, the interference fringes are more scatter and easy to be observed. As a result, the experiemtn proved,parallel flat crystal plane and angle of incident light is the best viewing angle for  $5^{\circ}$  , the best interference fringes can be observed.

(2) Adjusting the distance between the collimation light detector and the beam expander, we can detect the change of light collimation degree in different positions

by observing the change of interference fringes. The light source is a 633 nm He-Ne laser, and the beam magnification ratio is fixed at 10 times. According to step (1), we use the best observing angle (here is  $5^\circ$ ) between the collimation detector and the laser light. Then by adjusting the distance between the collimation light detector and the beam expander (15cm, 35cm, 55cm), we find that with the increasing of the distance, the larger the radius of curvature, interference fringes have become more and more sparse, shows that the beam after the beam expander is spherical wave, spherical wave curvature radius is different in different places, different radius of curvature of the former behind different interference of two beams of light Angle, namely the frequency of the interference fringes, the experiment proved that the greater the radius of curvature, the lower the interference fringe frequency (stripe is thick), spherical wave is more close to the collimating light.

(3) Based on the optimum condition in the use of (1) (2) design for wavefront characterizing light detector, we fix the position and angle of deflection, adjust the beam magnification ratio and change the beam parallelism to observe the change of the interference fringes after the collimation light detector. We find that when the magnification of the beam expander is 5 times, the interference fringes are sparse relatively, which illustrate that the degree of the beam collimation is high; when the magnification of the beam expander is 10 times, the interference fringes are crowded together. This shows that the greater the ratio of beam expander, the smaller the radius of curvature, interference fringe is intensive, the beam is far away from the collimating light.

**Keywords:** light beam collimator; Interference of light; wavefront Characteristics; Curvature

# 目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 激光准直及波面检测技术的发展与研究现状.....	2
1.2.1 激光准直及波面检测技术的发展.....	2
1.2.2 激光准直及波面检测技术的研究.....	2
1.3 本论文的研究内容与结构安排.....	3
参考文献.....	4
第二章 激光波面检测技术的研究基础.....	5
2.1 准直光检验器的基本原理.....	5
2.1.1 两束相干光干涉原理.....	5
2.1.2 准直光检验器的检验原理.....	7
2.2 检验激光波面的主要设备.....	11
2.3 本章小结.....	15
参考文献.....	16
第三章 激光波面检验实验装置及特性分析.....	18
3.1 检验激光准直的实验设计装置.....	18
3.2 激光准直检验实验及波面分析.....	20
3.2.1 观察 633nm He-Ne 激光器发出的激光准直度.....	20
3.2.2 不同角度验证准直光检验器观察激光波面特性.....	28
3.2.3 改变准直光检验器与激光距离观察激光波面特性.....	26
3.2.4 利用扩束镜倍率变化改变观察激光波面特性.....	22
3.3 激光波面特性检验实验数据分析.....	30
3.4 本章小结.....	33
参考文献.....	33



第四章 结论与展望 .....	35
-----------------	----

致谢 .....	37
----------	----

厦门大学博硕士论文摘要库

## CONTENTS

<b>摘要</b> .....	I
<b>Abstract</b> .....	III
<b>Chapter I Introduction</b> .....	1
<b>1.1 Research background and significance</b> .....	1
<b>1.2 Development and reseach status of laser collimation and wavefront</b> .....	2
1.2.1 Growth of the laser collimation and wavefornt detection technology.....	2
1.2.2 Research of the laser collimation and wavefornt detection .....	2
<b>1.3 Main Works and structral arrangement</b> .....	3
<b>References</b> .....	4
<b>Chapter II The principle of the light wavefront detection research</b> .....	5
<b>2.1 Principles of the collimation light detector</b> .....	5
2.1.1 Principles of two kind of coherent light .....	5
2.1.2 The basic priciple of the light collimaion detector .....	7
<b>2.2 Main equipment of the experimental setup</b> .....	11
<b>2.3 Concluding Remarks</b> .....	15
<b>References</b> .....	16
<b>Chapter III Experiment device and the analysis of laser wavefront</b> ...18	
<b>3.1 Experiment device of laser collomation</b> .....	18
<b>3.2 Laser collimation inspection experiment and wavefront analysis</b> .....	20
3.2.1 Observation of 633nm He-Ne Laser collimation .....	20
3.2.2 Different angles to verify the wavefront characterizing .....	28
3.2.3 Change the distance between the collimation light detector and the Laser to verify the wavefront characterizing.....	26
3.2.4 Change the beam expander ratio to observe the wavefront characterizing.....	22
<b>3.3 Experiment data analysis of laser wavefront detection</b> .....	30

<b>3.4 Concluding Remarks .....</b>	<b>33</b>
<b>References .....</b>	<b>33</b>
<b>Chapter IV Conclusions &amp; Prospects .....</b>	<b>35</b>
<b>Acknowledgements.....</b>	<b>37</b>

厦门大学博士论文摘要库

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景与意义

随着科学技术发展及研究的不断深入,在现代制造业对系统几何参数更高精度要求的背景下,开发新型器件,研究不同检测方式,减少测量过程中由于干扰或测量方式造成的误差已经刻不容缓,在现代制造业综合技术中,直线基准测量方法已经逐渐从众多新技术中脱颖而出,关系到建造物安全系数和使用寿命,受到越来越多部门的重视。

20 世纪 60 年代激光的问世,改变了整个科学学科版图分布,而其中直线基准测量技术的出现并快速迅猛发展,以准直激光束为直线基准的测量方式的应用越来越广泛,由于融合现代激光技术的特点,并使其具有高亮度、方向性单一和单色性的特点,激光准直及波面特性测量技术在整个准直及波面特性测量技术学科中应用率正在逐年扩大,并占据主导地位。激光准直及波面特性技术减少了在直线度、同轴度、平面度、平行度等形位误差,使得准直及波面特性技术的研究成为计测量试的重要研究领域之一<sup>[1]</sup>。新型激光准直及波面特性测量技术系统不仅具有结构简单、测量针对性强,而且实验验证操作上简易,使得在飞机制造业、船舶制造业、核工业设备制造等行业中被广泛使用<sup>[2-3]</sup>。

各行业科学制造技术的不断发展,均涉及光学工程中光学干涉测量技术的研究,准直光检测技术伴随行业的发展对测量精度的要求越来越高,越来越多的科研单位把时间和精力投入在工艺技术、检测技术和新型器件的研究开发上。据研究表明,准直及波面特性技术推动了精密仪器制造与检测、军工产品制造和大尺寸测量等领域直线基准测量的精度<sup>[4]</sup>,使得其在工业发展中具有重要的意义和广阔的前景。

随着社会经济实力不断发展,国家拥有更多的资金投入高科技人才培养和现代化实验室仪器完善中,研究准直光检测技术的机构和人才将不断的涌现出来,更多的研究者们更专注于致力寻找新材料、研发新型光学器件及检测方法中,不断的突破,相信不久的将来,整个准直光检测技术将推动并在工业现代化中扮演重要又关键的角色。

## 1.2 激光准直及波面检测技术的发展与研究现状

### 1.2.1 激光准直及波面检测技术的发展

激光准直及波面特性检测是基于直线基准的测量。早期,农村住宅建筑就发明了使用垂线法确认墙面垂直,当时是在尚未建筑的墙体一侧悬挂一条带着小重物引垂下呈现,墙体依此建筑确认垂直。而后人们又发现了拉钢丝法,这些原理相同,方法简单和直观,都是依靠借用重力自然下垂,但因受钢丝扭结或风吹钢丝偏摆的影响,而出现出差。这种粗糙测量方式应用于早期的制造和建筑业中,但随着现代制造业快速发展,大型机械设备安装和测量的精度的要求具有极度高标准特点,早期的做法已不能适应时代发展的技术要求。

而后发现传统的光学准直技术法,相比早期粗糙的测量方法,精度有了比较大的提升,其实就是利用自准直光管和望远镜在同一光路上进行测量,但在操作上依靠人员目视操作确认瞄准,另外又受机械调焦,由于精度差,故误差较大,而且一旦距离较远,其图像就出现模糊,而且容易受空气扰动<sup>[5]</sup>。

到了 20 世纪 60 年代,作为准直光检验技术的理想光源,激光技术的出现,促进了准直光检验技术的快速发展,由于具有高亮度、准直性、方向性、相干性等优点的激光,这些特点使得准直光检验技术的指准确性和高精度性得以大大提升,其中最典型的是激光器。除了测量应用之外,激光还被广泛应用于加工领域,特别是医疗激光切割,大大减轻病人医疗上的难点<sup>[6]</sup>。在准直光检验技术中,使用的光源有很多种,而其中最理性的光源拥有其他光源无法比拟的特点,首先是激光光源具有非常好的单色性使得其具有优越的相干性,另外其还具有方向性和光速平行性的特点,在立体空间上,其他本身发散的概率非常小。其辐射范围限定在比较窄的频率范围内。最后,激光具有高亮度,其发射叫是极其的细小,仅十分之一度左右,而其亮度同比其他普通光源高出几亿倍。激光具有的优越特性,使得激光作为准直及波面特性技术中的光源,并扮演着重要的作用<sup>[7]</sup>。

### 1.2.2 激光准直及波面检测技术的研究

从准直光检测技术的发展历史研究现状和世界性的研究深入程度差异来看,准直光检测技术方法可以归纳如下 3 种。

### (1)、振幅测量技术

这是是光学工程和光电技术融合的测量技术，首先是以激光为光源直线基准，从上分析可知激光具有的优越特性，并且结合 CCD 作为激光探测光波图像的工具，从而可以很好呈现分析和总结光相干的图像形状、大小、位置和移动的差异等。从光学准直及波面特性技术历史发展可以发现，其中提出很多优越的方法如：菲涅尔波带法、零级条纹干涉法等。这些实验检测方法被大范围的使用，但对误差避免仍无法根除，对空气的扰动仍无法避免。

### (2)、相位测量技术即传感器体现光波相位的变化<sup>[8-9]</sup>

实验中使用两种光束，一是激光光束，二是参考光束，由于光束直线度误差，引起干涉信号的相位变化，通过借助传感器可以检测变化从而得出信号，即是相位测量工作原理，而这种检测技术易受激光本身漂移特性的影响。依据目前研究方式有如下方法属于相位测量技术：双频激光干涉法<sup>[10]</sup>、直线光光栅测量法<sup>[11]</sup>、激光准直干涉法<sup>[12]</sup>等。

### (3)、偏振测量技术

实验中利用光束在光路中往返的对称中心作为准直基线，准直误差使得激光偏振方向的变化，我们可以通过检测变化信号，从而得出偏振测量技术，此方法较高灵敏度及空气扰动较低，而激光旋光准直仪是偏振测量技术的代表，其中其测量元件可以在光路中随机移动，使得精度相比其他方法提升很多<sup>[13]</sup>。

## 1.3 本论文的研究内容与结构安排

本文以平行光干涉原理的激光波面特性分析与测量技术为核心，利用准直光检验器小角度检测激光准直度的基础上，在光学干涉原理、干涉条纹特性、准直测量技术、实验原理、实验搭建、实验测量对比等多方面进行了细致深入的研究工作，本文综合运用了光学工程和光电技术学科知识，具体章节内容安排如下：

第一章是绪论，主要介绍了激光准直及波面特性检测技术的研究背景、发展历史及测量方法和研究现状。

第二章介绍了波面检测技术的研究基础，其中详细介绍两相干光原理，以及实验中使用的准直光检验器的基本原理，从得出观察准直光的方式。最后详细介绍本文使用的实验器件并介绍其作用。

第三章深入研究了激光波面检验实验装置及特性分析,实验安排了三种实验方法验证确认准直光检验器最佳适用条件,并对其实验中波面特性的干涉条纹特性进行了分析并得出实验结论。

第四章总结与展望,简要对本文的研究工作进行总结,并对将来的工作进行展望。

## 参考文献

- [1] 方仲彦, 殷纯水, 梁晋文. 高精度激光准直技术的研究(一) [J]. 航空计测技术, 1997,17(1):3-6
- [2] 沙定国. 光学测试技术 [M]. 北京理工大学出版社, 2010.
- [3] 吴健. 激光对中仪的工作原理及其应用 [J]. 工具技术, 2005,39(12):72-74
- [4] 陈强华, 吴 健, 殷纯水. 双频激光远程直线度/同轴度测量系统, 中国激光[J]. 2002, 29(7): 625~630
- [5] Francis Lilley, Michael J Laloer. David R Robust fringe analysis system for human body shape measurement [J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 187-195
- [6] 殷纯水. 双频激光同轴度干涉测量系统的研究[博士学位论文]. 清华大学光电工程研究所. 1996
- [7] 张新宝, 赵斌, 李柱, 无衍射光莫尔条纹准直、定位、跟踪系统. 激光技术[J]. 2001, 4.25(2)
- [8] 方仲彦, 殷纯水, 梁晋文. 高精度激光准直技术的研究(二) [J]. 航空计测技术, 1997, 17(2):5-8
- [9] 匡翠方, 冯其波, 刘斌等. 一种基于共路补偿激光漂移的直线度测量方法[J]. 光电工程, 2005, 32 (4):32
- [10] 匡翠方, 冯其波, 陈士谦等. 基于激光准直直线度测量方法的研究[J]. 光学技术, 2003, 29(6): 699
- [11] 刘欣, 冯其波, 殷纯水. 长距离高精度激光准直技术的最新发展, 测试技术学报[J]. 2002, 16
- [12] 郭志毅. 应用单模光纤进行激光准直的研究. [清华大学研究生论文], 1987
- [13] 张达聚. 激光准直干涉法测量导轨不直度 [J]. 计量技术, 1982(2): 23

## 第二章 激光波面检测技术的研究基础

激光准直检验器是基于两束相干光源发生干涉原理为基础而制作而成的透镜器件，并透过扩束镜改变激光准直及波面特性，通过 CCD 观察干涉条纹的变化来测量和计算干涉条纹的位移、形状等。准直光检验器本质上是一块平行平晶，其原理同经典物理学中的等厚干涉实验。其具有的大量程、高灵敏度、高精度等特点。准直光检验技术在现代制造业中扮演着重要和关键的角色，针对技术方案发展展现出多样化，我们大致可以分为两类：一类是利用塔尔博特自身成像和叠栅现象，另一类是剪切干涉法。当光栅由一单色准直光束照明时<sup>[1-3]</sup>，在一个界面上形成准确的光栅自身像。若第二块光栅放在光栅自身像处，我们很好可观察到叠栅条纹形状。光束的非准直性引起叠栅条纹的变化<sup>[4]</sup>。本文实验中使用激光作为光束，通过扩束镜改变光束的准直度，并通过准直光检验器前后透镜分振幅法，反射回到 CCD 产生干涉条纹，通过观察干涉条纹变化，从而确认光束的非准直性。即观察条纹变化，可以检测扩束后激光球面波的特性。

特别是对偶线性光栅、螺旋光栅、渐屈形光栅和圆形光栅进行光栅准直度检测的研究发现<sup>[5-6]</sup>，圆形光栅显现出特别的优越性。剪切干涉法中最广为应用的是默蒂的剪切干涉仪<sup>[7-9]</sup>，平行光源和干涉条纹作为光束准直性的基准，而干涉条纹和平行光源基准之间存在倾斜角，小角度倾斜使得光源发生干涉现象。后来 Kothiyal 等<sup>[10-11]</sup>对该技术进行对该技术进行优化，创造了自参考准直方法。最近，Anand 和 Narayanamurthy<sup>[12-13]</sup>又提出一种利用光折变晶体的衍射效应及激光束的时间相干性来检测光束准直性的新方法。

### 2.1 准直光检验器的基本原理

#### 2.1.1 两束相干光干涉原理

从大学物理中可知，光学按照研究内容可以分为几何光学、波动光学和量子光学三种情况，而光又是电磁波，实验课中我们将的光说的是可见光，而其实是让我们视觉有所感受的电磁波，我们生活中常见的是赤橙黄绿青蓝紫，给人以感觉不同的颜色，从光学的角度来说其频率是从小到达，波长从大到小。可见光的



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.